

# ZEMENT

Herstellung und Eigenschaften

Fritz Keil



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1971

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zement als Bindemittel in der Bautechnik</b>	<b>1</b>
1.1 Grundbegriffe der Verwendung von Zement	1
1.1.1 Anforderungen an Zement, an Beton, Stahlbeton und Spannbeton	1
1.1.2 Weitere Begriffe der Beton- und Mörteltechnologie	8
1.1.3 Geschichtlicher Überblick	12
1.2 Genormter und anderer üblicher Zement	15
1.2.1 Einteilung, Bezeichnung und Klassifizierung	15
1.2.2 Zusammensetzung und Eigenschaften	19
1.2.3 Sulfathüttenzement	25
1.3 Zement für besondere Verwendungszwecke (außer Quellzement und Tonerdezement)	26
1.3.1 Hydrophober Zement zur Bodenvermörtelung	26
1.3.2 Tiefbohrzement (oil well cement)	28
1.3.3 Asbestzement	31
<b>2 Chemie des Zementklinkers</b>	<b>35</b>
2.1 Chemismus und Eigenschaften des Klinkers sowie der hydraulischen Stoffe	35
2.1.1 Zementchemie und Zementtechnik	35
2.1.2 Wesen und Möglichkeiten der Klinkerrechnung	37
2.1.3 Klinkerphasen und Klinkereigenschaften	43
2.1.4 Berechnungsbeispiele und Variationsbreite	49
2.1.5 Weißer und farbiger Zement	51
2.1.6 Herstellen von Klinker mit hohem Kieselsäuregehalt	54
2.1.7 Chemische Zusammensetzung von Klinker und Zement	57
2.1.8 Chrom als Ursache der Chromatallergie	65
2.2 Reaktionen beim Sintern und Hydratisieren des Klinkers	66
2.2.1 Reaktionen beim Klinkerbrand, auch mit besonderem Rohmehl	66
2.2.2 Klinkerphasen	68
2.2.3 Klinkerstruktur als Folge des Sinterns, Schmelzens und Kühlens	72
2.2.4 Klinker aus besonderen Herstellungsverfahren (Basset-, Séailles-, Bayer-Verfahren)	75
2.2.5 Gleichgewichte beim Schmelzen und Sintern	77
2.2.6 Gleichgewichte beim Hydratisieren (Hydrolyse)	80
2.2.7 Reaktionsgeschwindigkeit und spezifische Oberfläche (Gips und Kalk als Beispiele)	83
2.3 Hydratationsprodukte	86
2.3.1 Silicatische Hydratphasen	87
2.3.2 Aluminatische und ferritische Hydratphasen	89
2.3.3 Chemische Wirkungen auf die Hydratphasen (CO <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub> , Zn- und Mg-Salze)	91

2.3.4	Bemessung des Kalksulfats . . . . .	95
2.3.5	Verlauf der Hydratation . . . . .	99
2.3.6	Ursachen der Erhärtung und Beständigkeit . . . . .	104
2.4	Hüttenzement und Puzzolanzement . . . . .	111
2.4.1	Zusammensetzung von Hüttensand, Puzzolane und anderen hydraulischen Stoffen . . . . .	111
2.4.2	Hochfenschlacke für Hüttenzement (Hüttensand) . . . . .	114
2.4.3	Puzzolane (Traß) . . . . .	121
2.4.4	Flugasche und Schmelzgranulat . . . . .	123
2.4.5	Bewertung von Puzzolane . . . . .	125
2.5	Forschungseinrichtungen und Bestimmungsverfahren . . . . .	129
2.5.1	Porenmessung . . . . .	129
2.5.2	Thermische Verfahren . . . . .	130
2.5.3	Lichtmikroskop . . . . .	132
2.5.4	Elektronenmikroskop . . . . .	135
2.5.5	Spektrographische Verfahren und Kernresonanz . . . . .	136
2.5.6	Röntgenbeugungsanalyse . . . . .	140
2.5.7	Betriebliche Anwendung von Prüf- und Meßverfahren (Automation) . . . . .	142
3	Physikalische Eigenschaften des Zements und Betons . . . . .	144
3.1	Vorgeschichte, Grobstruktur und Zuschlagstoffe . . . . .	144
3.1.1	Zement und Wasser beim Anmachen . . . . .	144
3.1.2	Störungen des Erstarrens und warmer Zement . . . . .	146
3.1.3	Bestimmung von Normsteife, Erstarren und Konsistenz . . . . .	149
3.1.4	Mischen, Verdichten und Nachverdichten (Ausgußbeton, Injektionsmörtel, Pumpbeton Rüttelbeton, Vacuumbeton) . . . . .	152
3.1.5	Grobstruktur von Normalbeton und Leichtbeton . . . . .	157
3.1.5.1	Strukturmerkmale . . . . .	157
3.1.5.2	Leichtzuschlag für Stahlleichtbeton . . . . .	158
3.1.5.3	Gas- und Schaumbeton . . . . .	161
3.1.6	Eignung der Zuschlagstoffe und Haftfestigkeit . . . . .	162
3.1.7	Alkali-Zuschlag-Reaktion . . . . .	165
3.2	Feinstruktur des Zementsteins . . . . .	170
3.2.1	Festigkeitsformeln . . . . .	170
3.2.2	Gelmodell von POWERS . . . . .	172
3.2.3	Eigenschaften von Porensystemen . . . . .	176
3.2.4	Wasserundurchlässigkeit . . . . .	177
3.2.5	Luftporengehalt und Frostbeständigkeit . . . . .	180
3.2.6	Zement und Beton im Straßenbau . . . . .	187
3.3	Festigkeit und deren Prüfung . . . . .	192
3.3.1	Zerstörende Prüfung . . . . .	192
3.3.2	Zerstörungsfreie Prüfung . . . . .	196
3.3.3	Einflüsse auf die Festigkeit (Winterbau) . . . . .	198
3.3.4	Entwicklung der Normenprüfung in Deutschland . . . . .	202
3.3.5	Schnellprüfung von Zement (Prüfung von Mörtelkleinzylindern) . . . . .	203
3.3.6	Festigkeit-Zuwachs-Diagramm (FZ-Diagramm) Bewertung hydraulischer Stoffe . . . . .	206
3.3.7	Auswertung und Darstellung von Ergebnissen . . . . .	211
3.4	Räumliche Veränderungen von Beton . . . . .	216
3.4.1	Schwinden, Schrumpfen, Kriechen . . . . .	216
3.4.2	Schwindprüfung und Schwindwerte . . . . .	218

3.4.3 Kriechen . . . . .	221
3.4.4 Raumbeständigkeit des Klinkers. Kalk- und Magnesiatreiben . . . . .	222
3.4.5 Quellszement . . . . .	227
3.5 Änderungen durch die Temperatur . . . . .	229
3.5.1 Hydratationswärme und Massenbeton . . . . .	229
3.5.2 Beschleunigen des Erhärtens durch Wärme (Allgemeines) . . . . .	236
3.5.3 Autoklavhärtung . . . . .	237
3.5.4 Wärmebehandlung unter 100 °C . . . . .	240
<b>4 Natürliche und technische Einflüsse auf Beton . . . . .</b>	<b>244</b>
4.1 Verwitterung und ihre Produkte (Zementrohstoffe) . . . . .	244
4.1.1 Wasser, Kohlensäure und Kalk in der Natur . . . . .	244
4.1.2 Kalkstein, Kreide, Kalkmergel . . . . .	248
4.1.3 Ton . . . . .	250
4.1.4 Übrige Carbonate und Calciumsulfate . . . . .	252
4.2 Korrosion und Korrosionsschutz der Bewehrung . . . . .	256
4.2.1 Betonangreifende Kohlensäure und pH-Wert von Lösungen . . . . .	256
4.2.2 Korrosion und Korrosionserlaß . . . . .	259
4.2.3 Einfluß von Zementstein und Chlorid besonders auf Stahl . . . . .	263
4.2.4 Carbonatisierung . . . . .	266
4.3 Chemischer Angriff und Schutzmaßnahmen . . . . .	268
4.3.1 Übersicht über Versuche, Erfahrungen und Vorschriften . . . . .	268
4.3.2 Angreifende Wässer, Lösungen und Gase . . . . .	272
4.3.3 Prüfung des chemischen Angriffs . . . . .	276
4.3.4 Versuche mit Meerwasser . . . . .	278
4.3.5 Einwirkung von Öl . . . . .	279
4.3.6 Betonzusatzmittel und Schutzanstriche . . . . .	280
4.3.7 Verfärbungen, Ausblühungen und Aussinterungen . . . . .	287
4.3.8 Besonderheiten von Hüttenzement . . . . .	289
4.4 Tonerdezement, feuerfester und feuerbeständiger Beton aus Tonerdezement und Portlandzement . . . . .	293
4.4.1 Tonerdezement . . . . .	293
4.4.2 Tonerdezement in Stahlbeton . . . . .	296
4.4.3 Feuerfester Beton (Feuerbeton) . . . . .	297
4.4.4 Wärme- und Feuerbeständigkeit von Stahl- und Spannbeton . . . . .	301
<b>5 Verfahrenstechnik des Brennens und Mahlens . . . . .</b>	<b>303</b>
5.1 Entwicklung der Brennöfen . . . . .	304
5.1.1 Vom Schachtofen zum Drehofen . . . . .	304
5.1.2 Sinterband . . . . .	307
5.1.3 Neuzeitliche Trockenverfahren. Wirbelschicht-Verfahren . . . . .	309
5.1.4 Herstellung und Eigenschaften der Granalien . . . . .	311
5.2 Heutige Brennöfen . . . . .	314
5.2.1 Schachtofen . . . . .	414
5.2.2 Lepolverfahren (Drehofen mit Rostvorwärmer) . . . . .	317
5.2.3 Schwebegas-Wärmetauscher-Verfahren (SW T-Verfahren, Drehofen mit Mehlvorwärmer) . . . . .	320
5.2.4 Langer Trockenofen . . . . .	325
5.2.5 Naßofen . . . . .	326
5.2.6 Vergleich der Brennverfahren . . . . .	327
5.2.7 Kühlen . . . . .	334
5.2.8 Theoretischer Wärmebedarf und Verbrennung . . . . .	337

5.3 Feuerfestes Futter, Brenngut und Gasphase . . . . .	343
5.3.1 Anforderungen an das Futter und Futterarten . . . . .	343
5.3.2 Bildung von Ansatz und Ansatzringen (Granulationsmodell) . . . . .	347
5.3.3 Einfluß der Asche . . . . .	349
5.3.4 Alkali- und Sulfatkreislauf . . . . .	351
5.3.5 Ansatzringe und ihre Beseitigung . . . . .	356
5.3.6 Veränderungen der ff. Steine im Ofen . . . . .	358
5.4 Ofenstaub, Entstaubung, Emission und Immission . . . . .	359
5.4.1 Ofenabgase und behördliche Anforderungen . . . . .	359
5.4.2 Schwefel- und Fluorverbindungen im Ofenstaub . . . . .	362
5.4.3 Ofenstaub und Landwirtschaft . . . . .	366
5.4.4 Entstaubungseinrichtungen . . . . .	369
5.4.5 Verringerung der Geräuschemission . . . . .	371
5.5 Mahlfeinheit, Mahlwiderrstand und Mahlhilfen . . . . .	372
5.5.1 Wesen der Zerkleinerung . . . . .	372
5.5.2 Bestimmung der Mahlfeinheit von Rohmehl und Zement . . . . .	375
5.5.3 Mahlwiderrstand von Klinker . . . . .	381
5.5.4 Mahlhilfen . . . . .	384
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>387</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>421</b>